



## 第十二章 检测与仪表

有两个学科与本章内容相关：

✓ 仪器科学与技术----测试计量及仪器

✓ 控制科学与工程----检测技术与自动化装置

# 检测与仪表

## 内容要点：

- 测量的基本概念
- 测量方法
- 测量误差
- 测量数据的读取
- 测量数据的处理
- 电工测量仪器及其性能
- 非电量测量仪表类别
- 传感器的组成、分类、特性
- 温度传感器

## 目的与要求：

- 能正确测量与读取数据
- 能正确操作常用的电工测量仪器
- 了解常用的传感器及原理
- 掌握温度传感器使用



# 测量的基本概念与测量方法

- 测量概念
- 常用的手工计量器具
- 常用的指针式仪器
- 常用的自动测量仪器
- 测量方法
  - ▣ 直接测量法
  - ▣ 间接测量法



# 测量概念

**概念**：将被测量和**作为测量单位的标准量**进行**比较**，得到被测量是测量单位的多少倍，并用数字和单位表示出来，以确定量值为目的**的操作**。

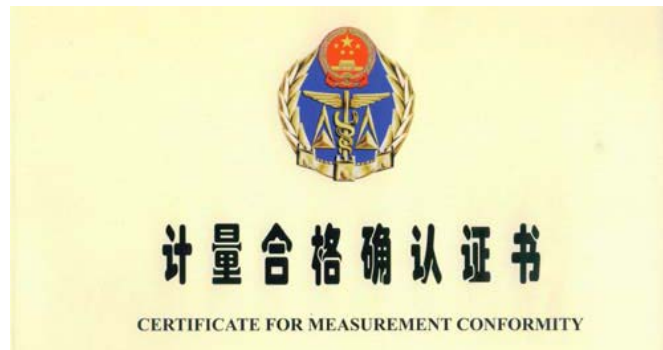
$X = nE$       被测量X是标准E的多少倍

测量的基本手段：**计量器具**----由计量部门(质量技术监督局)授权企业制造，生产的计量器具需要定期检定

计量器具的性能指标：测量的范围、测量精度

测量过程的核心：**比较**

**测量结果的标识**：数值(含±)、单位



# 常用的手工计量器具

## □ 长度测量



直尺



钢卷尺

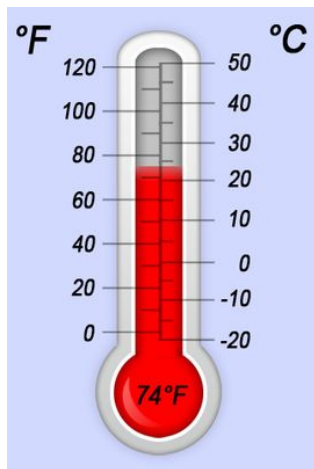


百分尺



千分尺

## □ 温度测量

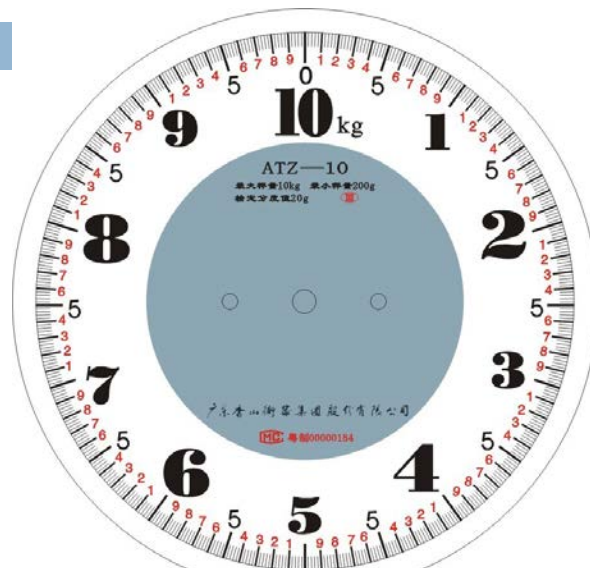


## □ 重量计量





# 常用的指针式仪器



# 常用的数字自动测量仪器



数字万用表



数字示波器



逻辑分析仪



电能质量分析仪



红外测温仪



激光测距仪

# 测量方法-1

## □ 按被测量获得方法分

- ▣ 直接测量法—参与测量的对象就是被测量的本身
- ▣ 间接测量法—通过与被测量有函数关系的其他量的测量获得被测量值

## □ 按测量方法分

- ▣ 直接比较测量法
  - ▣ 微差测量法
  - ▣ 零位测量法
  - ▣ 组合测量法
- } 直接测量法
- 间接测量法



# 测量方法-2

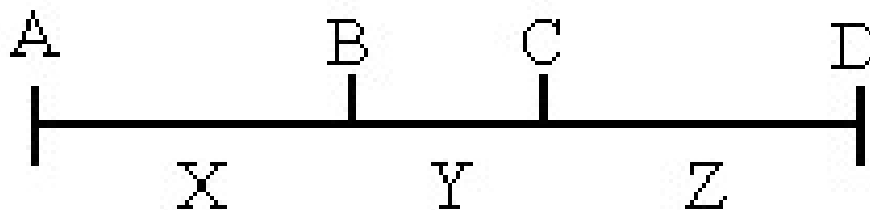
- **直接比较测量法**——被测量与已知其值的同类量进行比较
  - 例子：压力表、电流表、玻璃温度计
- **微差测量法**----只测微差，再与精度较高已知量相加
  - ▣ 例子：测量高度
- **零位测量法**----通过调整一个或几个与被测量有已知平衡关系的量实现测量，也叫补偿/平衡法
  - ▣ 例子：电位差计、平衡电桥测mV信号与电阻、电子天平
- **组合测量法**----利用直接或间接法测得一定数目的被测量的不同组合，列出一组方程，通过求极值的方法实现测量

## 测量方法-3-组合测量法之例

**例** 求出图7-5所示刻线AB、BC和CD间的距离。设AB、BC和CD的实际值分别为 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 。采用一般的方法解决这个问题时是用量具直接量出AB、BC、CD段的尺寸，然而这样的测量精度有限，欲提高其测量精度，可以同时测出AB、BC、CD以及AC、BD、AD各段尺寸，设直接测得的尺寸为：

$$AB = a_1 \quad BC = a_2 \quad CD = a_3 \quad AC = a_4 \quad BD = a_5 \quad AD = a_6$$

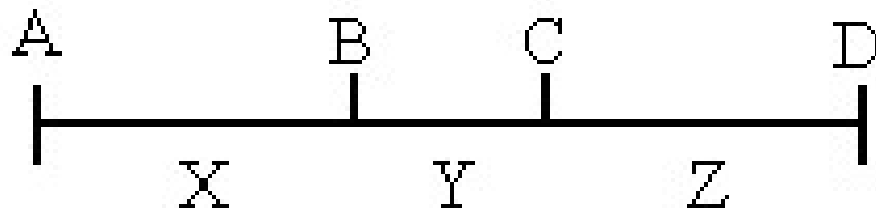
又设六次测量的测量值和实际值之间的误差是 $\varepsilon_i (i=1\sim6)$ ，求 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 。



# 测量方法-3-组合测量法之例解答

根据上述直接测量的结果，可以列出如下左边的方程组。  
本题即可转化为求解 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ ，使得目标函数  $F = \sum_{i=1}^6 \varepsilon_i$  取得最小值。将左式代入目标函数，对目标函数 $F$ 分别求对 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 的偏导，并令其都等于零，即可解出各变量的值如下：

$$\begin{cases} X - a_1 = \varepsilon_1 \\ Y - a_2 = \varepsilon_2 \\ Z - a_3 = \varepsilon_3 \\ X + Y - a_4 = \varepsilon_4 \\ Y + Z - a_5 = \varepsilon_5 \\ X + Y + Z - a_6 = \varepsilon_6 \end{cases} \quad F = \sum_{i=1}^6 \varepsilon_i \rightarrow \min \quad \begin{aligned} X &= \frac{1}{4}(2a_1 + a_4 + a_6 - a_2 - a_5) \\ Y &= \frac{1}{4}(-a_1 + 2a_2 - a_3 + a_4 + a_5) \\ Z &= \frac{1}{4}(-a_2 + 2a_3 - a_4 + a_5 + a_6) \end{aligned}$$



# 测量方法-3-组合测量法之例比较

□ 直接比较一次测量总长度值

□  $a_6$ -----测量相对误差较小

□ 直接比较分段测量总长度值

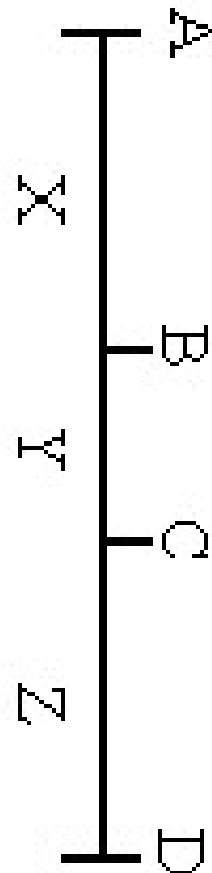
□  $a_1+a_2+a_3 -a_6=e_1$

□ 组合测量值总长度值

□  $0.25 (a_1+a_3+a_4+a_5+2a_6) -a_6=e_2$

□ 实际例子表明:  $|e_1| > |e_2|$

说明什么?



# 测量误差

- 什么是真值？
- 什么是误差？
- 误差如何衡量？
- 误差如何分类？





# 测量误差之真值的概念

- 真值：在一定的时间及空间条件下，被测量所具有的真实数值称之为真值。
  - 多级计量网：基准级、一级、二级、三级等
  - 在实际工作中通常引入相对真值来代替真值。
  - 按标准的逐级传递作为相对真值
  - 高级标准器的误差比低级标准器或普通仪器的误差相比，为其 $1/5$ 时，可认为前者的示值是后者的相对真值。

# 测量误差之误差的概念

□ **误差**：误差是指仪表指示值减去被测量的真值或相对真值。没有误差的测量是不存在的，研究误差目的是设法减小误差，保证测量值具有可信性。

▣ **绝对误差**：绝对误差等于测量结果减去被测量的约定真值或相对真值。

$$\Delta x = x - x_0$$

▣ **相对误差**：相对误差是指绝对误差除以被测的真值，用百分数表示。适合不同测量结果的误差比较。

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\%$$

▣ **引用误差**：引用误差是指绝对误差除以规定值(引用值:仪表的量程)，用百分数表示。

仪表有精度等级规定了最大引用误差，比如0.5级=0.5%的引用误差

$$\delta_{x_m} = \frac{\Delta x}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\%$$

# 测量误差之仪表误差与误差分类

## □ 仪表基本误差与附加误差

- ▣ 前者指仪表在参比条件下的示值误差。基本误差的最大允许值称为基本误差限。
- ▣ 后者指仪表偏离参比条件工作时，允许增加的额外误差。

## □ 测量误差分类

- ▣ **随机误差**：在对同一被测量的多次测量过程中，其变化是不可预计的。
- ▣ **系统误差**：在对同一被测量的多次测量过程中误差保持常数或其变化是可预计的。----可以补偿
- ▣ **粗大误差**：一般都是由于测量者粗心大意造成的，如测量时操作的错误、读数错误、计数错误或计算出现的错误等。----可以避免

# 测量误差之例

- 例：用三位半和四位半数字万用表的DC20V挡测量电压读数分别为 $V_1$ 和 $V_2$ ，测量某直流可调电源的读数如下表，分别求出用三位半表测量数据的绝对误差、相对误差、引用误差、最大引用误差。

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_1/V$	0.51	2.49	5.01	7.50	9.99	12.51	15.00	17.51	19.19
$V_2/V$	0.500	2.500	5.000	7.500	10.000	12.500	15.000	17.500	9.500

- 分析：搞清楚以下几个问题，不难求
- 什么是三位半和四位半？哪一个精度高？
  - DC20V档给了了什么样的信息？
  - 将哪一个值作为真值？
  - 三位半在DC20V档的仪表量程上下限是多少？

# 测量数据的读取

□ 数据的有效数字与其表示方法及运算规则

□ 数字式仪表读取



□ 指针式仪表读取

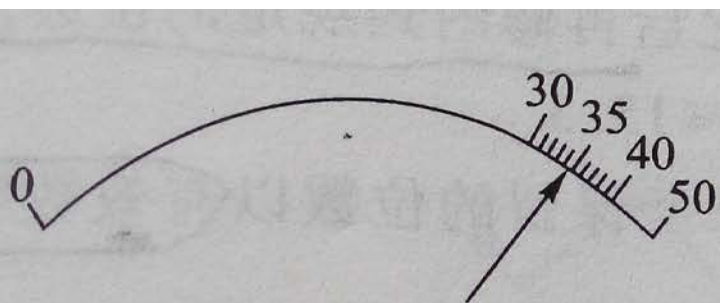




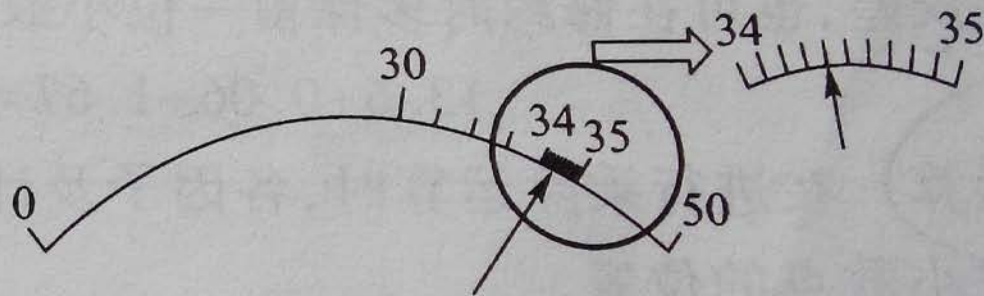
# 测量数据的读取之有效数字-1

## 有效数字的概念

- 有效数字：为了保证测量数据的有效性，记录的测量数据应当由**准确数字**、**估计数字**和**单位**三部分组成。其中，“准确数字”和“估计数字”两部分合起来称为有效数字。有效数字位数越多，准确度越高。要合适地选择有效数字位数。



(a) 刻度为每小格1 V的读数



(b) 刻度为每小格0.1 V的读数

# 测量数据的读取之有效数字-2

## □ 表示方法

- 记录测量数据时，只允许保留一位欠准数字
- 在第一个非零数字前的“0”不是有效数字。
- 大数值与小数值要用幂的乘积形式来表示。
- 当有效数字位数确定以后，多余的位数应一律按四舍五入的规则舍去，称为有效数字的修约。
- 表示常数的数字可认为它的有效数字位数无限制，可按需要取任意位。

# 测量数据的读取之有效数字-2

- 有效数字的运算规则：当测量结果需要进行中间运算时，有效数字的取舍，原则上取决于参与运算的各数中精度最差的那一个数的有效数字位数。
  - ▣ 加减法：按小数点位后位数最少者进行修约
    - $13.6+0.056+1.666\approx 13.6+0.1+1.7=15.4$
    - $13.6+0.056+1.666\approx 13.6+0.06+1.67=15.33\approx 15.3$
  - ▣ 乘除法：按有效数字位数最少者进行修约
    - $0.12*1.057*23.41\approx 0.12*1.1*23=3.036\approx 3.0$
  - ▣ 乘方与开方：运算结果比原数多一位有效数字
    - $15.4^2\approx 237.2$      $\text{sqrt}(2.7)\approx 1.64$
  - ▣ 对数：取对数前后的有效数字位数相同
    - $\text{Ln}230\approx 5.44$

# 数字式仪表读数的读取

- 数字式仪表可直接读出被测量的量值，读出值即可作为测量结果予以记录而**无需再经换算**。
- 需注意的是：对数字式仪表而言，若测量时量程选择不当，则会丢失有效数字，因此应合理地选择数字式仪表的量程。
- 例子：测量一个2V以内的电压值

量程	2V	20V	100V
显示值	1.282	01.28	001.2
有效数字	4	3	2

# 指针式仪表测量数据的读取

- 使用指针式仪表之前，应使仪表的指针指到零的位置（**调零！**）
- 指针式仪表在读数时，应使**视线与仪表标尺平面垂直**，并读取足够的位数，以减小和消除视觉误差。
- 仪表常数：表示每格多少的值。
- 为减少测量误差，一般应采取多次测量取平均值。一般需经过换算才可得到所需的测量结果，不过目前的很多表在刻度的标识上已换算完成。



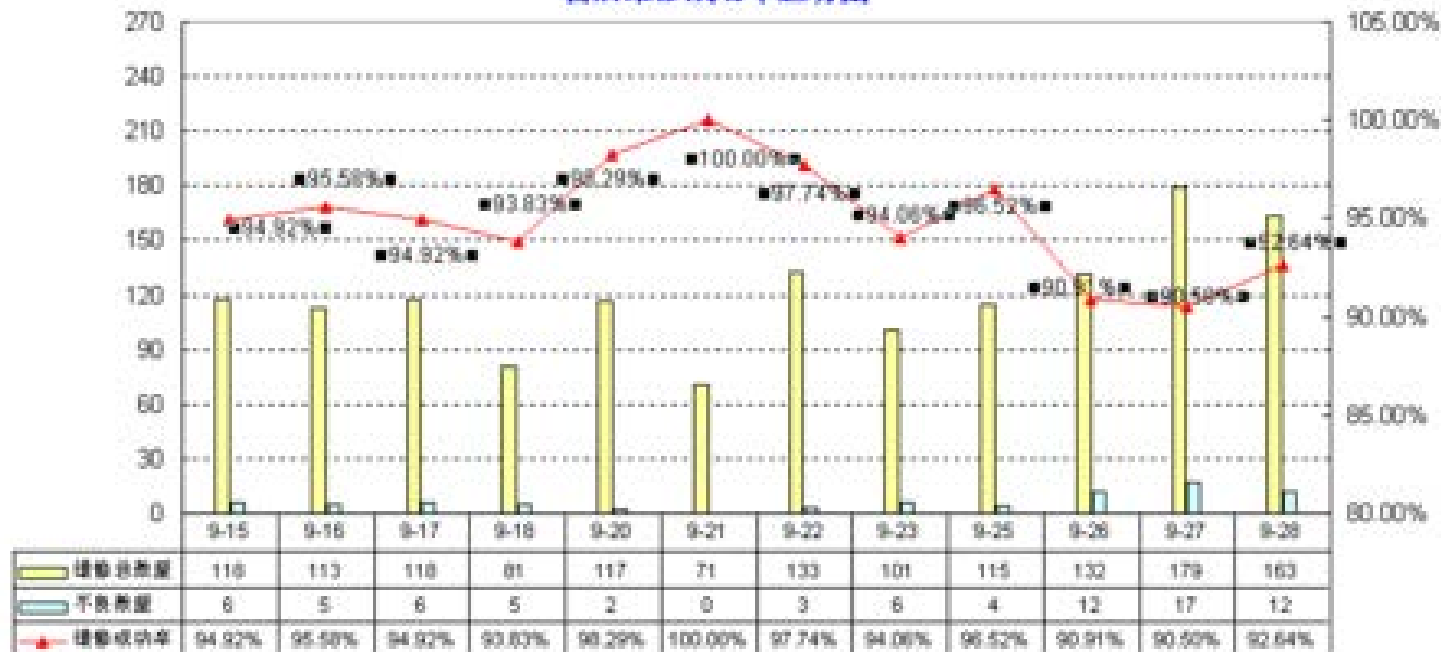
# 数据处理

## □ 列表法

## □ 作图法

日期	9-15	9-16	9-17	9-18	9-20	9-21	9-22	9-23	9-25	9-26	9-27	9-28
维修总数量	118	113	118	81	117	71	133	101	115	132	179	163
不良数量	6	5	6	5	2	0	3	6	4	12	17	12
维修成功率	94.92%	95.58%	94.92%	93.83%	98.29%	100.00%	97.74%	94.06%	96.52%	90.91%	90.50%	92.64%

售后维修成功率趋势图



# 数据处理之列表法

- **列表法：** 数据处理中最常用的一种方法，它将实验数据按照某种规则、次序列成表格，根据数据的对应关系，我们就能容易地看出实验结果的某种规律以及实验中出现的问題。
- **应遵循的原则**
  - 表格上方应注明表格名称，表内标题栏应有物理量的中文名称、英文名称和单位。
  - 表格要简单明了，分类清楚，便于查阅、分析和归纳。
  - 表格中的数据要用正确的有效数字表示。
- **使用工具**
  - Excel
  - Word

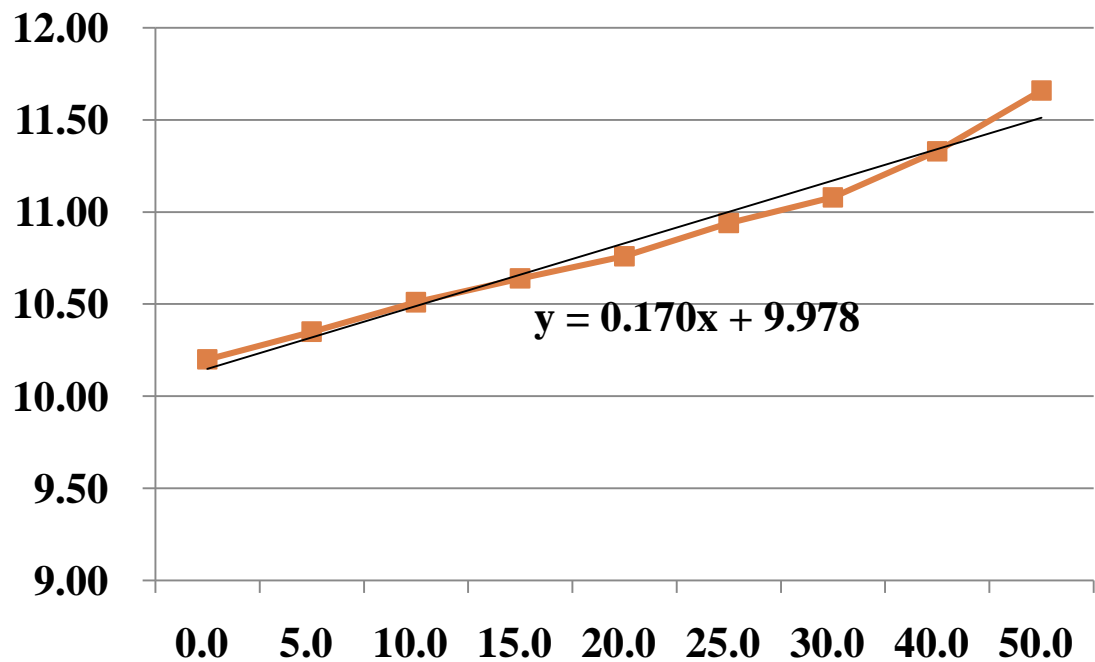
# 数据处理之作图法

- 作图法：将两个或三个物理量的一系列对应测量值用坐标纸描绘出来，以几何图线直观地反映物理量之间的某种对应关系。
  - 二维图
  - 三维图
- 具体要求：注意坐标轴、多图线标注、剔野值
- 使用软件工具
  - Excel
  - MATLAB

# 数据处理之例

铜电阻温度传感器特性的实验测试数据

测量次数k	1	2	3	4	5	6	7	8	9
测量温度/ $^{\circ}\text{C}$	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	40.0	50.0
电阻值 $R_t/\Omega$	10.20	10.35	10.51	10.64	10.76	10.94	11.08	11.33	11.66



# 电工测量仪表

□ 分类

□ 性能指标

□ 指示符号

□ 工作原理

□ 电压、电流与电阻的测量





# 电工测量仪表之分类

- 电工测量仪表有标准仪表与实用仪表之分，通常所使用的是实用仪表

(1) 按被测量可分为

{ 电流表 电阻表  
电压表 电能表 功率表

(2) 按测量原理可分为

{ 磁电式 电磁式 等等  
电动式 感应式

(3) 按测量方法分为

{ 直读式  
比较式

(4) 按测量电路种类为

{ 直流仪表 交流仪表  
交直流两用仪表

(5) 按使用方法分为

{ 面板式  
便携式  
台式

# 电工测量仪表之性能指标-1

## □ 准确度十八个等级

标准为《GBT 13283-2008 工业过程测量和控制用检测仪表和显示仪表精确度等级》

- ✓ 0.005、0.01、0.02、0.03、0.05、0.1、0.2、0.25、0.3、0.35、0.4、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、4.0、5.0
- ✓ 以最大引用误差(a%)标识
- ✓ 正确选择准确度等级
- ✓ 精确度表示： $\pm(a\% \times \text{RDG} + n\text{个字})$  ,RDG读数值

## □ 测量范围与量程：按规定精确度进行测量的范围

- ✓ 量程= $X_{\max} - X_{\min}$

## □ 灵敏度：反映仪表的被测参数变化的灵敏程度。

- ✓  $K = \Delta y / \Delta x$

## □ 分辨率：装置可以有意义地区分两紧邻所示量值的能力。---输出显示的最小变化量。

# 电工测量仪表之性能指标-2

- 例子：DT890C型数字万用表,用DC2V档，精度为 $\pm(a\% \times \text{RDG} + 1 \text{个字})$ ， $a=0.5$ ，现用该挡测量直流电压为1.650V，求真值的范围。该挡的分辨率是多少？
  - ▣ 1.641~1.659V；1mV
- 其他指标
  - ▣ 阈值：能引起测量仪表输出被测量的最小变化值
  - ▣ 重复性：同一输入同一方向多次测量时一致性
  - ▣ 漂移：输入输出特性随时间慢变化的现象

# 电工仪表上的指示符号

- 测量单位符号
- 仪表工作原理符号
- 电流种类和额定值符号
- 准确度等级符号
- 工作位置符号
- 绝缘强度符号
- 端钮、转换开关、调零器和止动器符号
- 电表使用条件分组符号
- 电表按外界条件分组符号

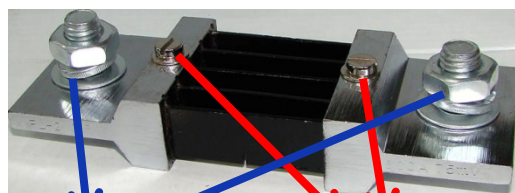
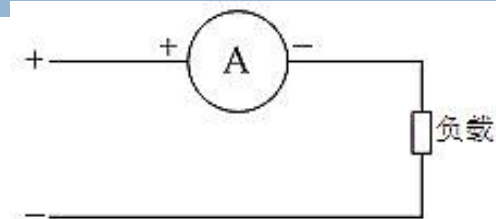
# 工作原理

- 以直读式仪表为例，这类仪表通入电流后产生电磁作用，使可动部分受到电磁转矩而发生转动。转动转矩与通入电流存在一定的关系
- 三部分组成：产生转动转矩的部分、产生阻转矩的部分、阻尼器
- 典型的有(这部分内容自学)
  - ▣ 磁电式仪表----测量直流电压、电流和电阻
  - ▣ 电磁式仪表----测量交流电压和电流
  - ▣ 电动式仪表----测量交/直流电压、电流和功率

# 电流、电压、电阻的测量-1

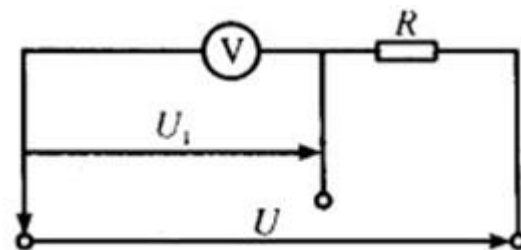
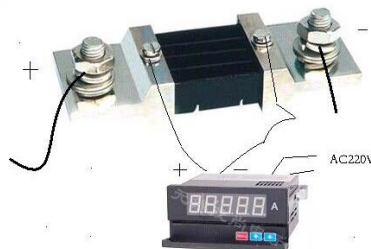
## □ 直流电流的测量

- 直流一般采用磁电式仪表
- 电流表串接在电路中；电压表并接在电路中
- 注意极性与量程
- 为扩大量程，常用分流器与电流表并联(分流器的电阻与电流表内组成一定比例)；倍压器与电压表串联



电流端钮

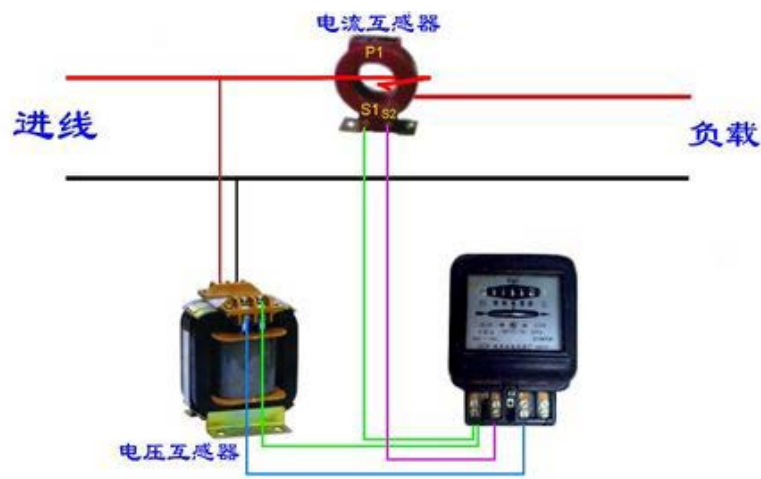
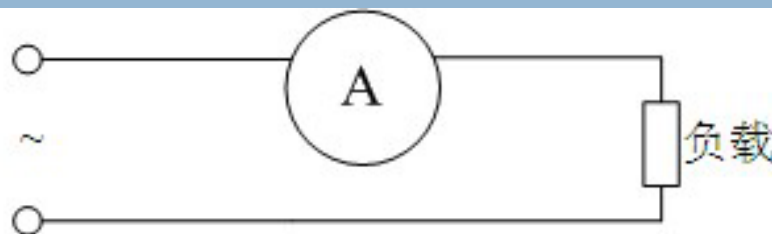
电位端钮



# 电流、电压、电阻的测量-2

## □ 交流电流、电压的测量

- 交流一般采用电磁式仪表
- 测电流，电流表串联在电路中；测电压，电压表并联电路中
- 可借助电流互感器扩大电流测量量程，一般二次绕组侧额定电流大部分是5A或1A；可借助电压互感器扩大电压测量量程，一般二次绕组的额定电压为100V。

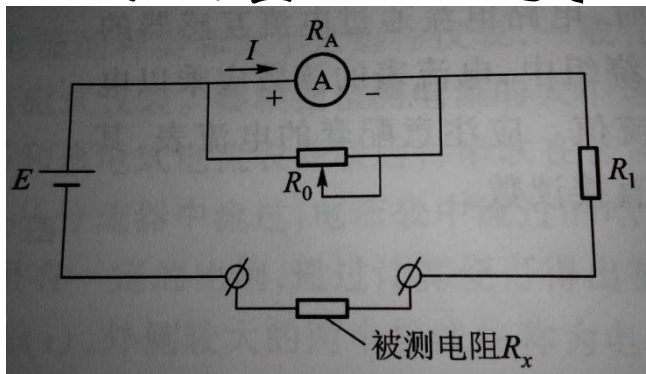


# 电流、电压、电阻的测量-2

## □ 互感器使用过程中要注意：

- 对**电流互感器二次绕组不允许断路**，否则将造成铁心发热，同时又使二次绕组端电压增高。一般应将铁心和二次绕组的一端接地。
- 对**电压互感器二次绕组不允许短路**，否则阻抗下降，电流急增，绕组因剧烈发热而烧坏。一般应加熔断器保护，并将铁心与二次绕组的一端接地。

## □ 电阻的测量---一般采用磁电式



$$I = \frac{E}{R_x + R_1 + \frac{R_0 \cdot R_A}{R_0 + R_A}} \cdot \frac{R_0}{R_0 + R_A}$$



# 非电量检测仪表

- 非电量种类远远多于电量，因此，非电量检测仪表比电工检测仪表更为常见，更具有普遍性。下图为几种常用非电物理量检测仪表：



a) 大气压力计



b) 液体密度计



c) 转速表

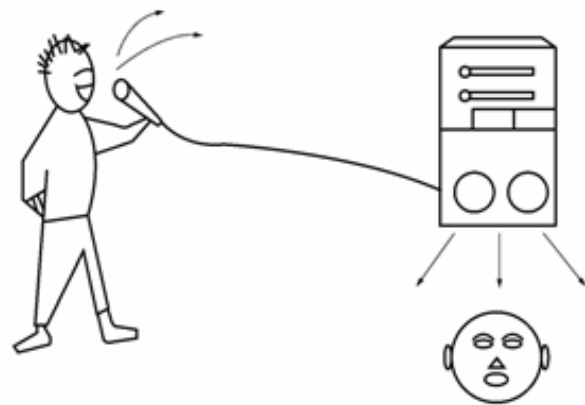
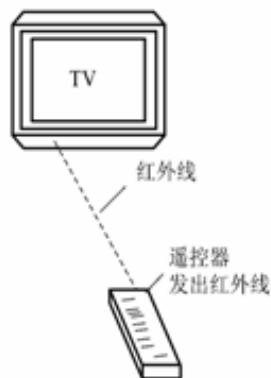


d) 空气流量计

- 分类：按被测量分：被测量千变万化
- 按性质分：标准表、实验室用表、工业用表

# 传感器sensor

- 传感器基本概念
- 传感器的组成
- 传感器的分类
- 传感器的基本特性
- 温度传感器
  - ▣ 热电阻
  - ▣ 热敏电阻
  - ▣ 热电偶



# 传感器基本概念

- 传感器(敏感元件、检测器、转换器)是能感受规定的被测量并按一定的规律将其转换为可用输出信号的器件或装置。
- 几种常用的传感器



a) 光电传感器



b) 温度传感器



c) 位移传感器

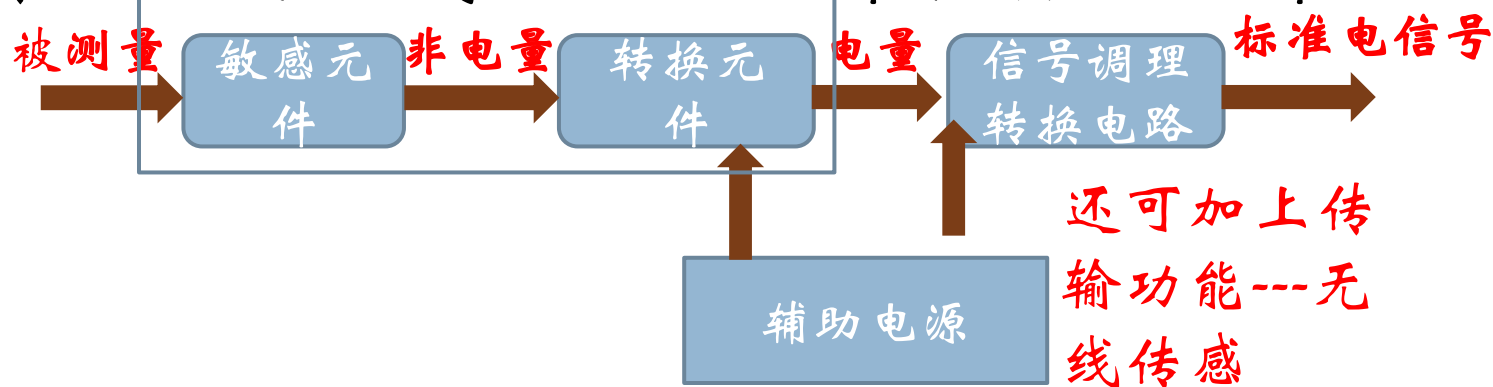


d) 压力传感器

- 基本形式: 非电物理量  $\rightarrow$  电参数/电量
- 重要性: 传感器是测量的原点, 是构成控制系统的不可或缺的部分

# 传感器的组成

## □ 传感器的组成：敏感元件和转换元件



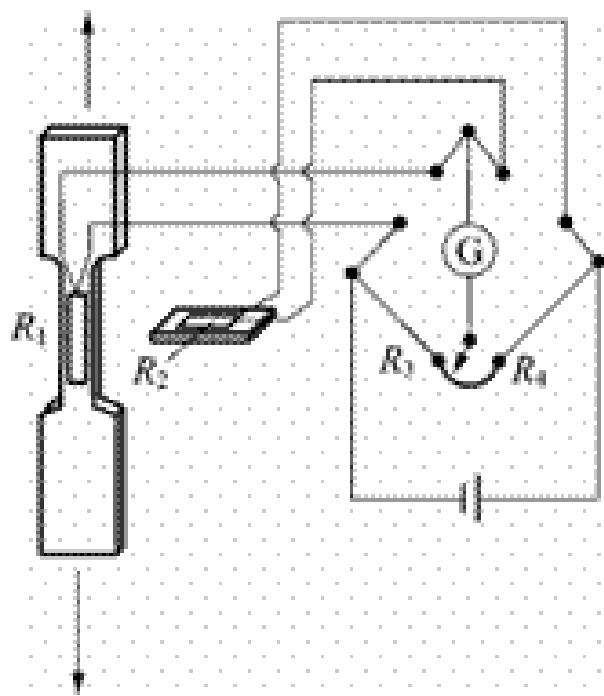
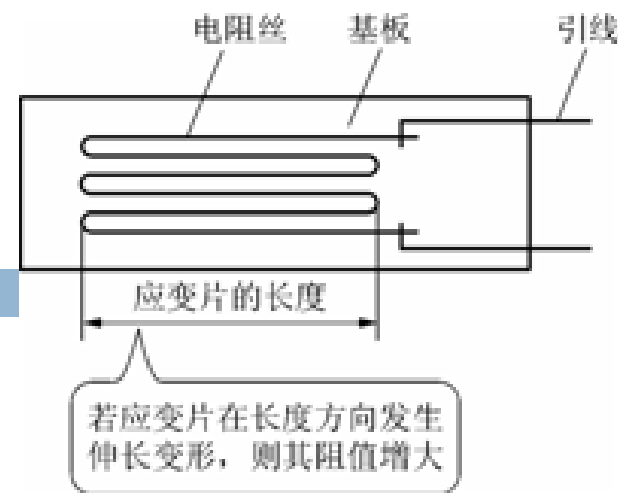
□ 敏感元件：能直接感受或响应被测量的部分，通常实现非电量到易于变换的非电量

▣ 例：弹性元件

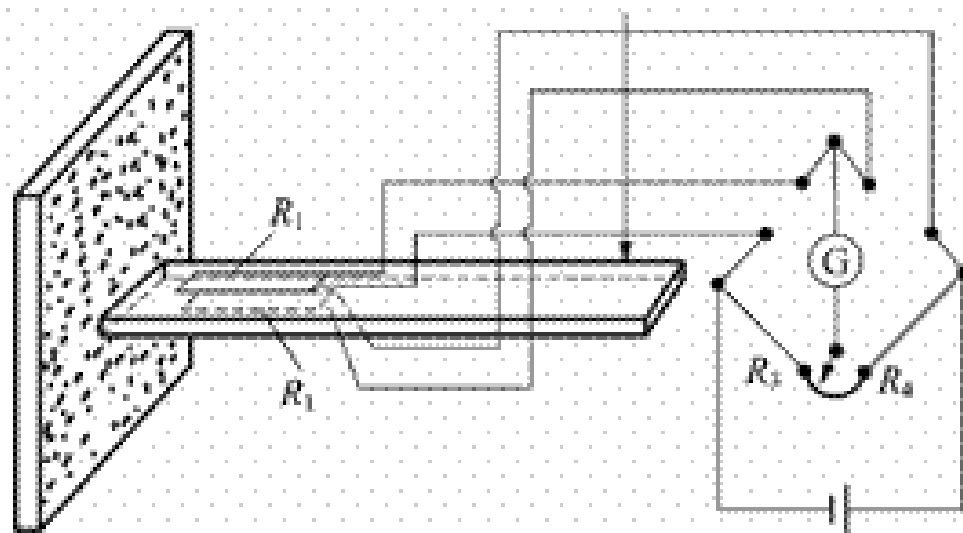
□ 转换元件：实现非电量到电量的转换

□ 例：电阻应变片、霍尔元件——利用物理或化学原理制成

# 传感器工作例子---应变测量



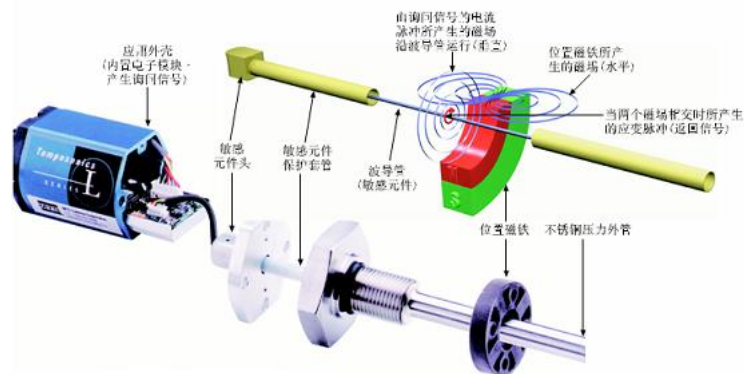
单片



双片

# 传感器的分类-1

- 按被测物理量分类：位移传感器、速度传感器、温度传感器等。

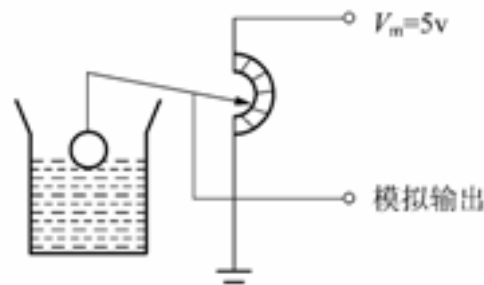
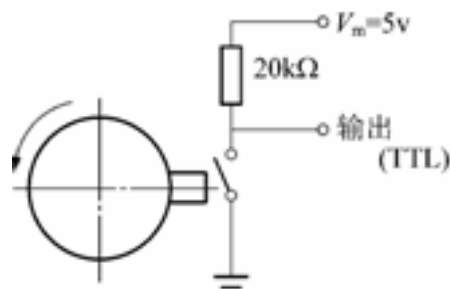


- 按工作原理分类：电阻式、电感式、电容式、磁电式、压电式、光电式、热电式、电化学式和核辐射式



# 传感器的分类-2

- 按能量的传递方式分类：能量控制型（即无源传感器）、能量变换型（即有源传感器）和能量传递型（间接传感器）
  - ▣ 能量控制型：电阻式、电容式、电感式
  - ▣ 能量变换型：压电式、热电偶、光电池
  - ▣ 能量传递型：超声波换能器、激光测距器、核辐射检测
- 按输出信号的性质分类：模拟传感器和数字传感器两类。



# 传感器基本特性

- 基本特性是指输出（电量）与输入（被测物理量）之间的关系，通常用静态和动态特性来描述：
  - 传感器的静态特性：被测量的值处于稳定状态的输入输出关系。
    - 指标：线性度、灵敏度、迟滞性、重复性
  - 传感器的动态特性：传感器的动态特性是指其输出对随时间变化的输入量的响应特性。
    - 指标：响应时间

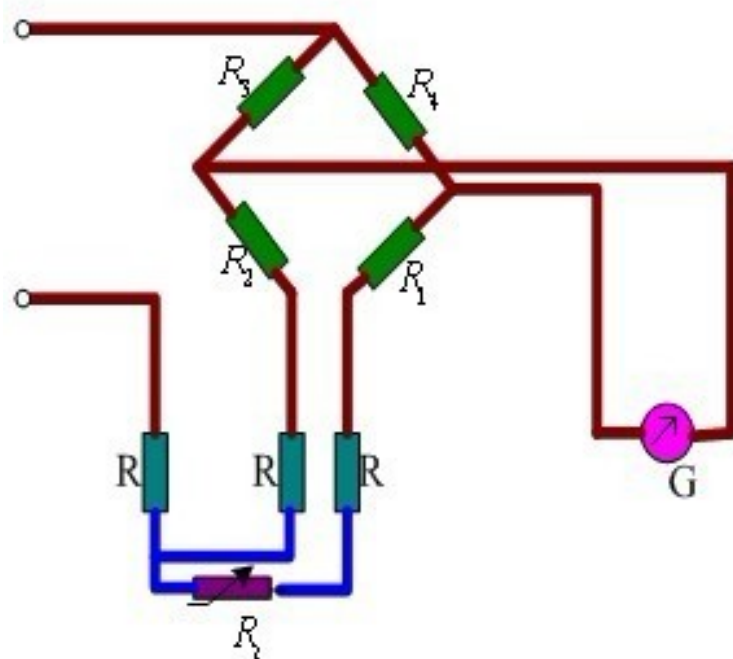


# 温度传感器-1



可以很好的消除引线电阻!

- 热电阻 有二、三、四线制接法，**三线是常用的** 思考：Why?
- 利用导体的电阻随温度变化的特性，广泛使用的是Cu和Pt
- Pt100的线性化特性：测量范围： $-600^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$
- 利用分度表更准确  $R_t = R_0(1 + \alpha t), R_0 = 100, \alpha = 0.00385^{\circ}\text{C}^{-1}$



电桥平衡时：

$$(R_t + R + R_1)R_3 = R_4(R_2 + R)$$

$$\Rightarrow R_t = \frac{R_4}{R_3}(R_2 + R) - R - R_1$$

当  $R_3 = R_4$  时， $R_t = R_2 - R_1$  与  $R$  无关

# 温度传感器-2

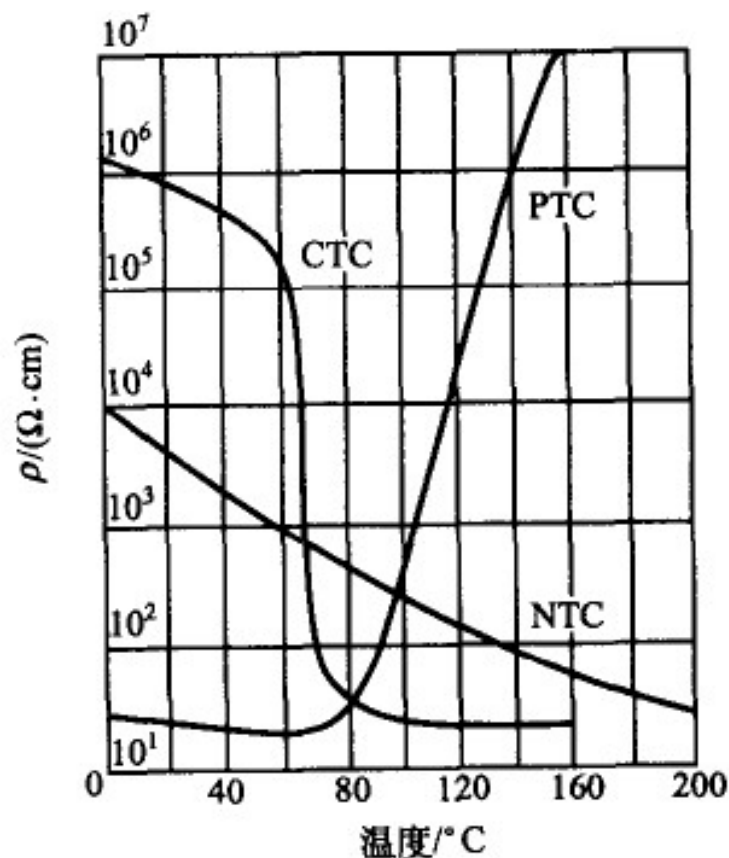
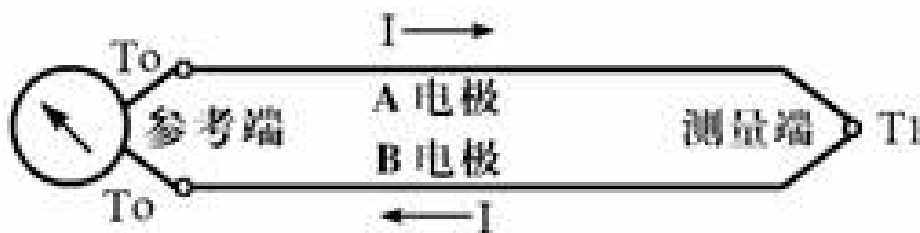
- 热敏电阻--利用半导体电阻随温度变化的特性，有珠状、片状、杆状



- PTC(正温度系数)
- NTC(负温度系数)
- CTC (临界温度系数)

- 热电偶

- 利用热电动势效应制成



# 你需要明白

- 传感器是与外界交互的重要窗口
- 根据你的需要选择合适的传感器
- 仪表使用时多个心眼
- 非电到电的转换需要相关的知识储备
- 只有实践才能真正认识和理解



爱护眼睛，  
就能擦亮心灵窗户